

Ref: Haglesundbrua_kapasitetsutnyttelse_hengebru.docx

Til : Paulius Bagdonas (SVRV)
Fra : Aas-Jakobsen v/Georg A. Bugge
Dato : 10. NOVEMBER 2019
Kopi : Frode Aarland (SVRV), Marianne Skulstad (SVRV), Sindre Egeland (SVRV), Arne Eikefet (Lindås kommune), Alexander Helle (Meland kommune)

Emne : Haglesundbrua – kapasitetsutnyttelse hengebru

Innhold

1	Sammendrag.....	3
2	Brua.....	5
3	Analysemodell.....	6
3.1	RM Bridge.....	6
4	Materialer.....	6
5	Laster.....	7
5.1	Lastkombinering.....	7
5.2	Egenvekt.....	7
5.2.1	Påhengt gangbane.....	8
5.2.2	Rekkverk.....	8
5.3	Trafikk.....	8
5.3.1	Trafikksituasjon 1: Opprinnelig trafikksituasjon.....	10
5.3.2	Trafikksituasjon 2: Påhengt gangbane + vogntoglast i to eksisterende kjørefelt....	11
5.3.3	Trafikksituasjon 3: Påhengt gangbane + vogntoglast i tre felt.....	12
5.3.4	Trafikksituasjon 4: Påhengt gangbane + vogntoglast i to eksist. felt + brannbil....	13
5.3.5	Oppskruingsmoment.....	14
6	Kapasitetskontroll.....	15
6.1	Dimensjonering.....	15
6.1.1	Kabel.....	15
6.1.2	Undergurt.....	15
6.1.3	Overgurt.....	16
6.1.4	Diagonaler.....	16
6.2	Trafikksituasjon 1: Kapasitetskontroll.....	17
6.3	Trafikksituasjon 2: Kapasitetskontroll.....	17

6.4	Trafikksituasjon 3: Kapasitetskontroll.....	17
6.5	Trafikksituasjon 4: Kapasitetskontroll.....	17
7	Usikkerhet	18
8	Konklusjon	18
9	Referanser.....	18

1 Sammendrag

Haglesundbrua krysser Hagelsundet i Hordaland, og forbinder Flatøy med fastlandet ved Knarvik. Brua ligger på E39, og er et kritisk ledd langs en hovedtransportåre hvor det ikke finnes gode omkjøringsmuligheter. Hengebrua åpnet i 1982, og har i dag to kjørefelt samt en smal gangbane. Aas-Jakobsen utfører forprosjekt med formål om å montere påhengt gangbane, og kunne utnytte eksisterende brutverrsnitt til et tredje kjørefelt. Formålet er å bedre trafiksikkerhet for myke trafikanter, og å sikre fremkommelighet for utrykningskjøretøy i en nødsituasjon hvor det står tosidig kø over brua.

Aas-Jakobsen har tidligere utført en mulighetsstudie, oppsummert i rapport 12-2332_Haglesundbrua_Rapport_Rev-B /6/, hvor kabelutnyttelsen for ulike konfigurasjoner av trafikk og påhengt gangbane er vist. 10.09.2019 ble det utsendt et notat, Haglesundbrua_alternative_kjøremønstre /7/, hvor det ble sett nærmere på de mest realistiske alternativene, og hvor det ble diskutert ulike muligheter for regulering av kjørefeltet nærmest den påhengte gangbanen. Håndberegningene i disse notatene viste at det var realistisk å tillate en påhengt gangbane med føringsbredde 2,5-3,0 m, sammen med ordinær trafikk i to felt, men at det mest sannsynlig måtte knyttes en form for regulering til bruken av det tredje kjørefeltet.

Det er nå utført elementanalyse med beregningsverktøyet RM Bridge Enterprise, v11.05.00.10.

I dette notatet er resultatene fra håndberegningene verifisert, og det er valgt å fokusere på følgende trafiksituasjoner:

1. Opprinnelig trafiksituasjon: Trafikk og egenvekt som brua i sin tid ble dimensjonert for.
2. Påhengt gangbane + vogntoglast i de to eksisterende kjørefeltene
3. Påhengt gangbane + vogntoglast i tre kjørefelt
4. Påhengt gangbane + vogntoglast i de to eksisterende kjørefeltene + brannbil i felt nærmest påhengt gangbane

Alle trafikkklaster er i henhold til bruksklasse Bk10/60, beskrevet i R412 /1/.

Utnyttelsene for de ulike lastsituasjonene er oppsummert i Tabell 1:

Tabell 1: Utnyttelse av viktige konstruksjonselementer for ulike lastsituasjoner.

Trafiksituasjon	Trafikk	Kabel	Undergurt	Overgurt	Diagonaler	Tverrfagverk	Betongdekke
1.	Opprinnelig: To felt	0.82	0.89	0.87	0.66	Aksellaster er dimensjonerende*	
2.	Påh. gangbane + to felt	1.00	1.09	0.89	0.78		
3.	Påh. gangbane + tre felt	1.06	1.29	1.22	0.93		
4.	Påh. gangb. + to felt + brannbil	1.00	1.25	1.09	0.82		

* Aksellastene som brua ble dimensjonert for er større enn aksellastene i R412 (Bk10/60), så disse konstruksjonselementene har uten ytterligere beregning kapasitet for Bk10/60.

Trafikksituasjon 1 skal representere brua med de lastene den opprinnelig ble dimensjonert for, og benyttes kun som et referansetilfelle for sammenligning.

Trafikksituasjon 2 gir en kabelutnyttelse på 100%, og med unntak av undergurt har alle andre konstruksjonselementer tilstrekkelig kapasitet. For undergurten er det nødvendig med en begrenset forsterkning for å oppnå akseptabel utnyttelse. Totalt er det behov for at ca. 200 m undergurt må forsterkes (4 felt á 50 m), ca. 3,5 tonn stål.

Trafikksituasjon 3 med tre kjørefelt + påhengt gangbane gir en utnyttelse av kabelen på 106%. Dette anses å være uakseptabelt høyt, og en slik normalsituasjon er derfor lite aktuelt selv om det skulle søkes om fravik. Denne belastningen krever også vesentlige behov for forsterkning av undergurt, i hele bruas lengde.

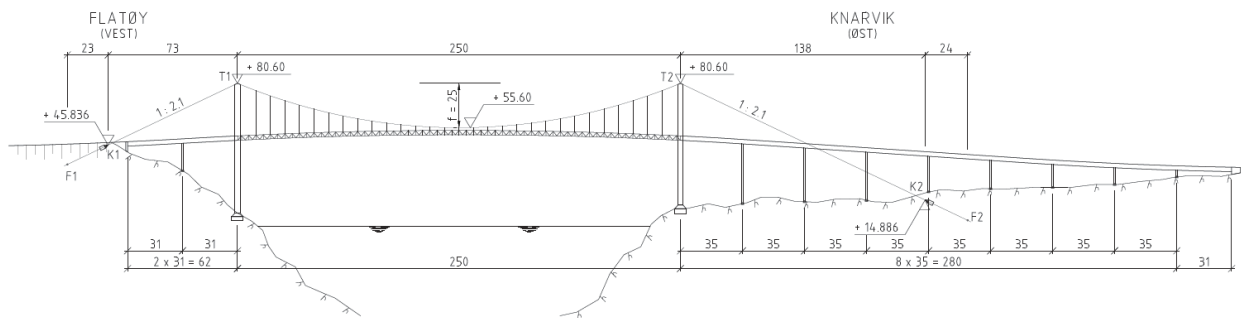
Trafikksituasjon 4 med vogntoglast i de to eksisterende kjørefeltene + brannbil i feltet nærmest den påhengte gangbanen er tenkt å representere en nødsituasjon hvor trafikken står stille i begge retninger på brua, og hvor nødkjøretøy må passere på utsiden av trafikken. Sannsynligheten for at en slik lastsituasjon faktisk oppstår er svært liten. I praksis vil trafikken i forkant av en ulykke i hver kjøreretning kunne forlate brua. Kabelutnyttelsen blir 100%, mens undergurten har kapasitetsoverskridelser på opptil 25%.

Det virker rimelig å konkludere med at normalsituasjonen på brua fortsatt må være kjøring i de to eksisterende kjørefeltene, men at det i en nødsituasjon kan tillates at utrykningskjøretøy passerer trafikken på et opphøyd felt. Situasjonen med fri kjøring i tre felt gir så høy overskridelse av kabelens kapasitet at det ikke kan anbefales å gå videre med dette alternativet.

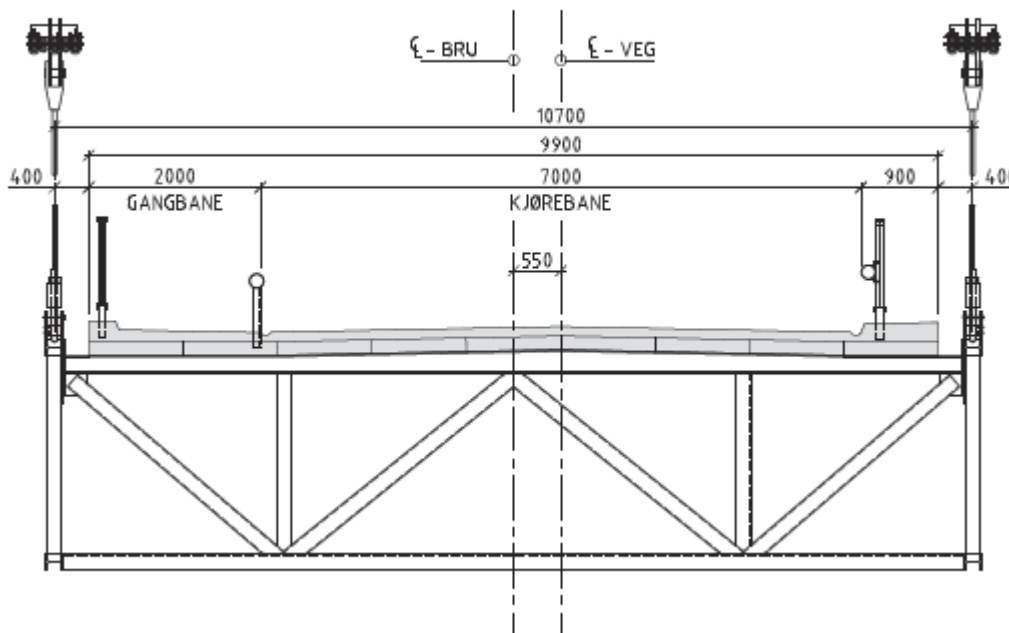
For å sikre at feltet nærmest den påhengte gangbanen kun benyttes av utrykningskjøretøy, foreslås det at arealet bygges opp som et fortau med avvisende føringskant. For å holde vekten lav kan fortauet f.eks. konstrueres av stålister med kapasitet til å tåle tunge hjultrykk, og utformes slik at det er mulig å rengjøre og inspisere under ristene.

2 Brua

Haglesundbrua er en hengebru som åpnet i 1982. Brua har et hovedspenn på 250 m, og med tilhørende betongviadukter er total lengde 623 m. Brutversnittet i hengespennet består av et underliggende stålfagverk med betongdekke, hvor betongdekket er oppbygd av betongelementer med påstøp. Avstanden mellom kabelplanene er 10,7 m, og bredde mellom eksisterende ytterrekkverk er 8,63 m.



Figur 1: Oversikt Haglesundbrua



Figur 2: Typisk tverrsnitt i hengespenn

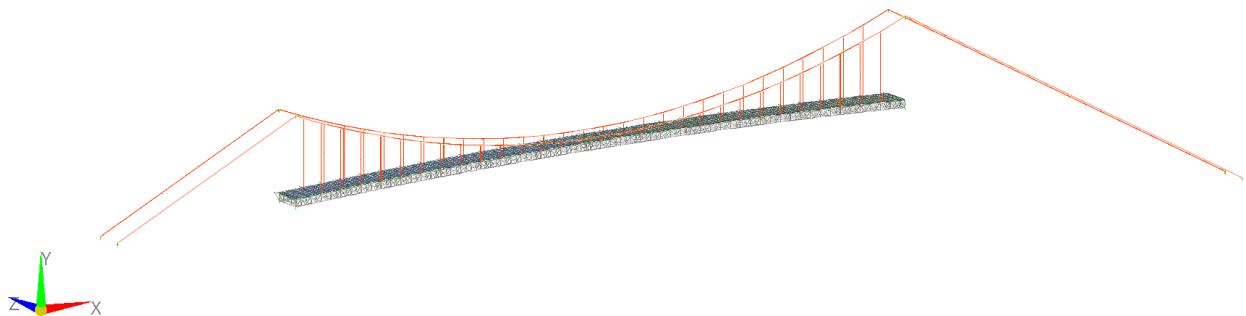
Tenkt løsning for påhengt gangbane er vist i Figur 6.

3 Analysemodell

3.1 RM Bridge

Hengebrua er modellert i RM Bridge Enterprise, v11.05.00.10. Brua er modellert forenklet, med fokus på de delene av konstruksjonsdelene som dimensjoneres av trafikk. Det vil si at tårn, og kabelpilarer er modellert som enkle opplegg, mens kabel, hengestenger og fagverk er modellert med så stor nøyaktighet som mulig.

I modellen som er benyttet for å hente ut resultatene i dette notatet er betongdekket modellert som en bjelkestreng. Det gir ikke riktig fordeling av kreftene i tverrfagverket, men i langsgående elementer gir denne forenklingen meget nøyaktige resultater.



Figur 3: Komplette analysemodell.

4 Materialer

Granskning av opprinnelige konstruksjonstegninger og materiallister viser at materialkvalitetene i Tabell 2 er benyttet på brua. Materialfaktorer er hentet fra R412 /1/.

Tabell 2: Flytespenning og bruddlast for fagverk, betong og kabelelementer i hengebru.

Hengebru					
Konstruksjonsdel		Materiale	f_y [N/mm ²]	Materialfaktor	f_{yd} [N/mm ²]
Fagverk	Overgurt, langsgående	St52	345	1,10	314
	Undergurt, langsgående	St52	345	1,10	314
	Diagonaler, langsgående	St52	345	1,10	314
	Tverrfagverk	St52	345	1,20	288
	Vindfagverk	St52	345	1,20	288
Betongdekke	Betong	C45	28	1,40	20
	Armering	Ks50/40s	500/400	1,25	400/320
Konstruksjonsdel	Bruddlast				
Kabel	12 stk á 5000 kN				
Hengestang	1770 kN				

5 Laster

Avsnittet gir en oversikt over alle analyserte laster.

5.1 Lastkombinering

Det er foreløpig kun sett på kombinasjon av egenvekt, trafikk og oppskruingsmoment. Det bør senere gjøres analyse hvor vind påsettes. Tidligere kontroller har vist at kombinasjon a, bruddgrensetilstand (R412 /1/), med trafikk som dominerende last, er dimensjonerende.

Tabell 3: Lastkombinasjoner iht. R412.

Tabell 3.3-1 Lastfaktorer for bruddgrensetilstanden

Lastgruppe Kombinasjon	Permanente laster, P		Deformasjons- laster, D	Variable laster Q
	Jordtrykk, J	Andre		
a	1,0	1,15 ⁽¹⁾ ⁽²⁾	γ_D	$\gamma_1 \cdot Q_1$
b	1,0	1,0	1,0	$\gamma_2 \cdot Q_1 + 0,8 \cdot \Sigma Q_n$

⁽¹⁾ Ved kontroll for engangstransporter settes lastfaktor for andre permanente laster til 1,1.

⁽²⁾ Lastfaktor for permanente laster settes lik 1,0, dersom dette er ugunstigere.

Tabell 4: Lastfaktorer benyttet i analysen.

Last	Ugunstig	Gunstig
Egenvekt	1,15	1,00
Bk10/50, Bk10/60	1,30	0,00
Oppskruing	1,00	1,00

5.2 Egenvekt

Egenvekten for alle deler av brua som er modellert er beregnet automatisk av programmet.

Det er benyttet følgende egenvekter:

Betong: 25 kN/m³

Stål: 77 kN/m³

I tillegg er det påsatt egenvekt for asfalt, betongfortau, rekkverk og påhengt gangbane. Det er noe avvik mellom egenvekt av fagverket ifølge materiallistene, og egenvekten RM Bridge beregner. Dette skyldes ekstra vekt i knutepunkter. Avviket er påsatt som jevnt fordelte laster langs relevante elementer i fagverket

$$\text{Asfalt (80 mm):} \quad g_{asf} = 2,0 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 8,65\text{m} = 17,3 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{Betongkanter (nord):} \quad g_{bet,1} = 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot 0,1\text{m} \cdot 0,9\text{m} = 2,25 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{(syd):} \quad g_{bet,2} = 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot 0,11\text{m} \cdot 0,33\text{m} = 0,93 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{(syd, ekstra påstøp)} \quad g_{bet,3} = 0,52 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

5.2.1 Påhengt gangbane

Det antas en påhengt gangbane i kompositt med totalvekt 2 kN/m, som samsvarer med tverrsnitt som er benyttet på Melvold bru. Den påhengte gangbanen henges inn ved hver hengestang, slik at spennvidden blir ca. 8.2 m.

5.2.2 Rekkverk

På eksisterende brutverrsnitt beholdes kjøresterkt rekkverk på side nærmest påhengt gangbane. På side lengst fra påhengt gangbane, og på ytterside av påhengt gangbane, benyttes høyt sikkerhetsrekkverk. Vektene settes som følger:

Rekkverk, nærmest påhengt gangbane:	$g_{rekk,1} = 0,5 \frac{kN}{m}$
Rekkverk, lengst fra påhengt gangbane:	$g_{rekk,2} = 0,8 \frac{kN}{m}$
Rekkverk, på påhengt gangbane:	$g_{rekk,påh} = 0,8 \frac{kN}{m}$

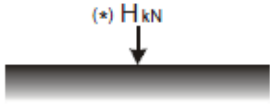
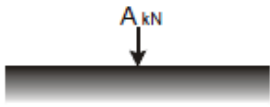
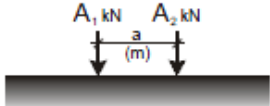
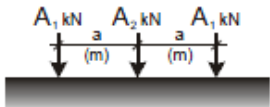
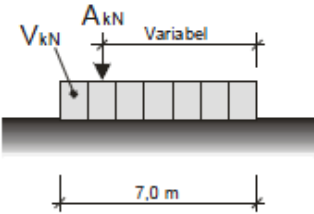
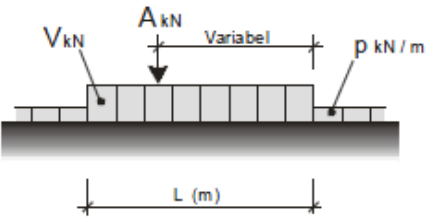
5.3 Trafikk

Trafikklastene er omhandlet i R412. For hver bruksklasse er det definert et sett med seks ulike trafikklasttilfeller. Haglesundbrua skal klassifiseres for bruksklasse Bk10/60, som tar utgangspunkt i et hjultrykk på 80 kN, og en vogntoglast på 600 kN. For langsgående elementer er det vogntoglasten (med tilhørende jevnlast) som er dimensjonerende, mens for tverrfagverk er trippelboggi dimensjonerende.

Det er sett på fire forskjellige trafikksituasjoner:

1. Opprinnelig trafikksituasjon: Trafikk og egenvekt som brua i sin tid ble dimensjonert for.
2. Påhengt gangbane + vogntoglast i de to eksisterende kjørefeltene
3. Påhengt gangbane + vogntoglast i tre kjørefelt
4. Påhengt gangbane + vogntoglast i de to eksisterende kjørefeltene + brannbil i felt nærmest påhengt gangbane

I trafikksituasjon 4 regnes det også med lasten av en tung brannbil. Vekten settes til 250 kN, og lengden på lasttoget settes til 7 m.

Lasttype	Lastkonfigurasjon	Bruksklasser					
			Bk10 600 kN	Bk10 500 kN	BkT8	Bk8	Bk6
Hjullast		H	80	56	56	42	
Aksellast		A	160	112	112	84	
Boggilast		A ₁	65	40	40	30	
		A ₂	160	112	112	84	
		a	1,3	1,2	1,2	1,2	
Trippelboggilast	 Aksellastenes rekkefølge er vilkårlig	A ₁	70	60	50	40	
		A ₂	140	84	84	56	
		a	1,3	1,2	1,2	1,2	
Kjøretøylast	 Aksellasten plasseres i ugunstigste stilling	A	40	32	32	24	
		V	300	280	220	180	
Vogntoglast	 Aksellasten plasseres i ugunstigste stilling	A	40	32	32	24	
		V	600	500	420	320	280
		L	18,0	16,0	16,0	16,0	16,0
		p	6	6	6	6	

(*) For lette brudekker (ståldekker, gitterrister etc.) skal det, uansett bruksklasse, kontrolleres for en hjullast på 35 kN (inkl. dynamisk tillegg) fordelt på en 20x20 cm flate tilfeldig plassert i kjørebanelen.

Figur 3.2-1 Bruksklasser (inkl. dynamisk tillegg)

Figur 4: Lasttyper og tilhørende laster for ulike bruksklasser.

5.3.1 Trafikksituasjon 1: Opprinnelig trafikksituasjon

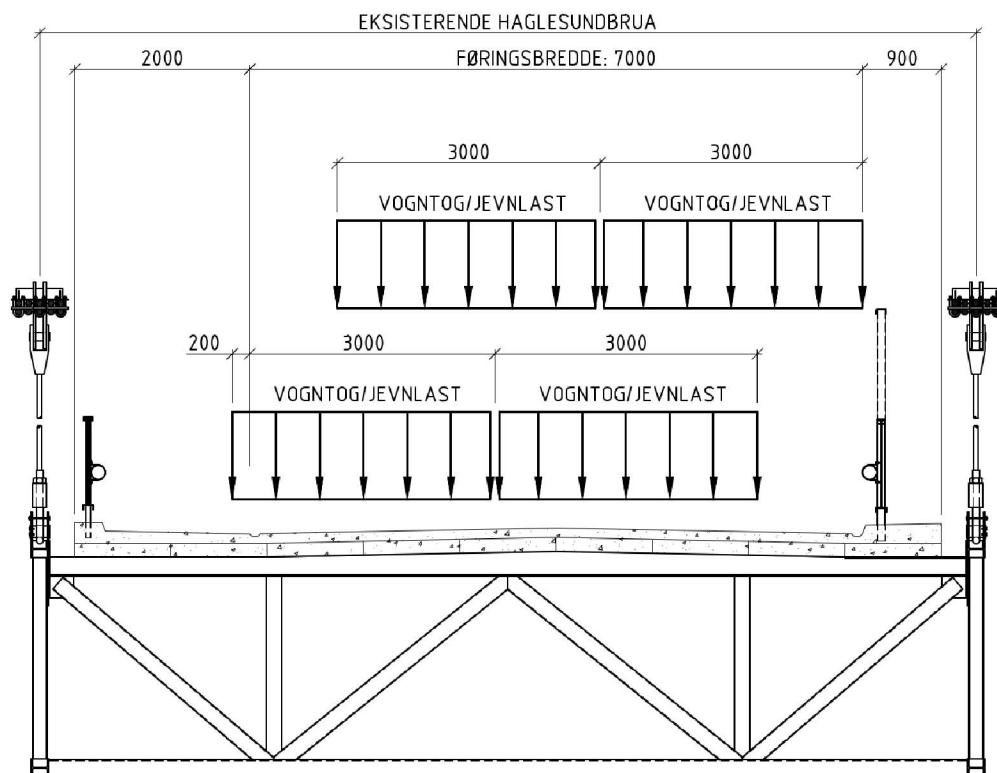
Analysen av opprinnelig trafikksituasjon er tenkt som et referansetilfelle, og bidrar til å verifisere at konstruksjonsutnyttelsene som rapporteres er rimelige.

De viktigste endringene siden brua ble bygget er at den ble bygget med betongslitelag og uten asfalt, samt at det selvsagt ikke var montert påhengt gangbane.

Trafikklastene på brua var i henhold til internordisk lastforskrift (1971), med jevnlast og knivlaster i de samme to kjørefeltene som benyttes i dag. For dimensjonering av kablene ble det også påsatt ganglast i det venstre feltet. I resultatene som presenteres i dette notatet er det sett bort fra ganglasten, og det er benyttet Bk10/60 vogntoglast fra R412 istedenfor lastene i internordisk lastforskrift.

Lastene i internordisk lastforskrift er noe høyere enn det som foreskrives med bruksklasse Bk10/60.

Denne trafikksituasjonen tjener dermed til å gi et bilde av hvor stor påvirkning senere påført asfalt, påhengt gangbane og eventuelt et tredje kjørefelt har for den totale utnyttelsen.

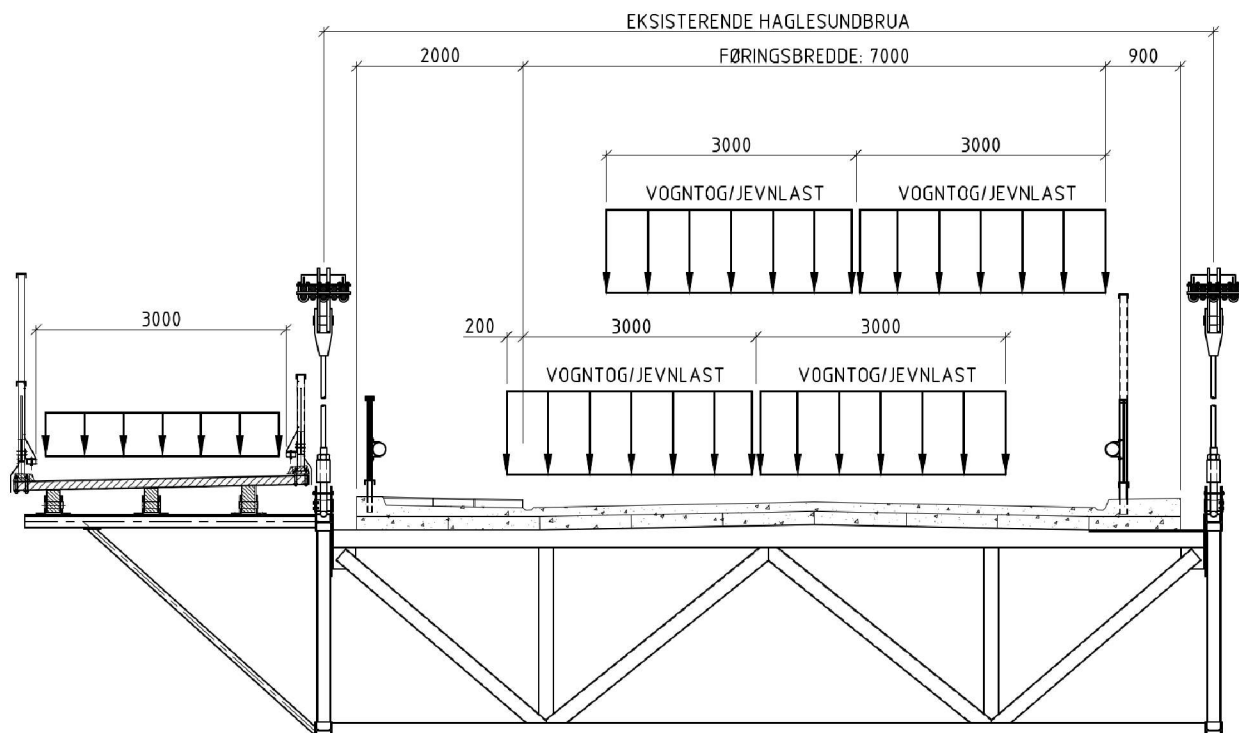


Figur 5: Opprinnelig trafikksituasjon: Kjørelast i to felt, ikke asfaltlast eller påhengt gangbane. Ekstrem lastposisjon høyre/venstre i analysen er vist på skissen. Opprinnelig var eksentrisiteten 200mm mindre i venstre retning, men det er forenklet benyttet samme eksentrisitet som i trafikksituasjon 2.

5.3.2 Trafikksituasjon 2: Påhengt gangbane + vogntoglast i to eksisterende kjørefelt

Det planlegges for at normal trafikksituasjon på brua er som nå, med to kjørefelt som plasseres innenfor dagens føringsbredde. Området som benyttes som gangbane idag bygges opp som et fortau med stålrister, slik at det ikke kan benyttes av ordinær trafikk. Det antas 3,0 m føringsbredde på den påhengte gangbanen, og 1 kN/m² ganglast.

Det forutsettes at fortausarealet sikres slik at det ikke er tilgjengelig for myke trafikanter, og det er derfor ikke regnet med ganglast på denne delen av brua.

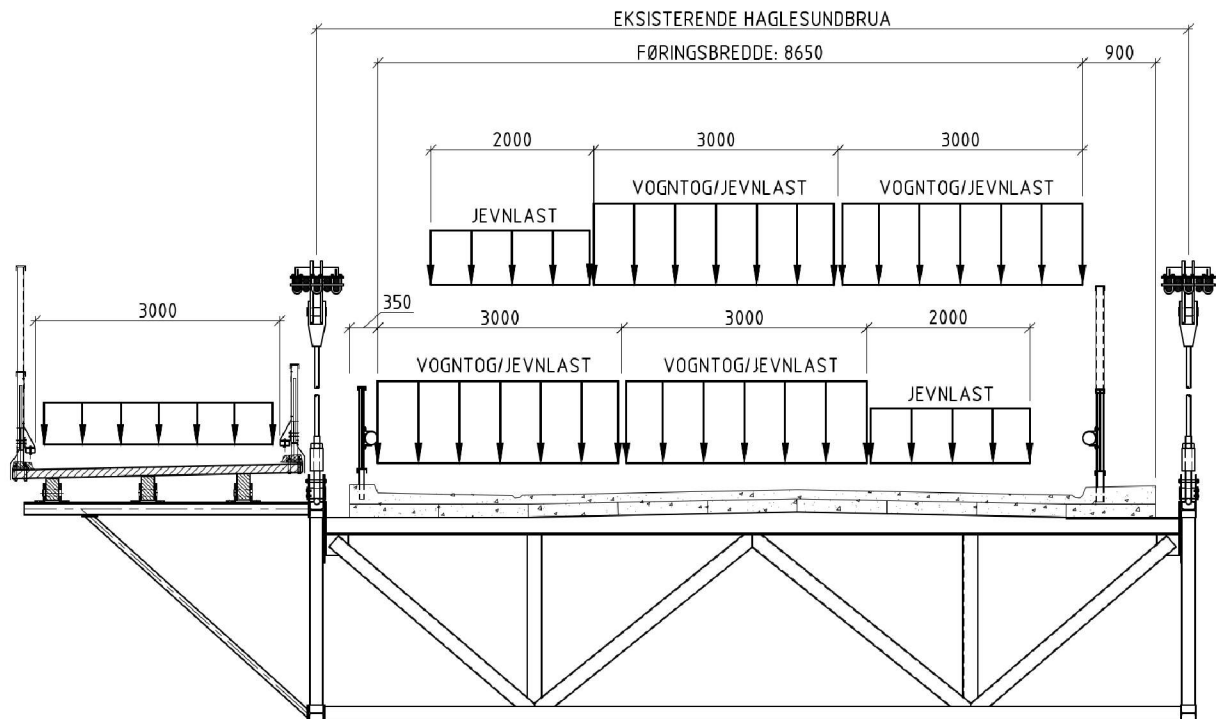


Figur 6: Påhengt gangbane+ fri kjøring i to felt. Ekstrem lastposisjon høyre/venstre er vist på skissen. Påhengt gangbane belastes med 1 kN/m². Opphøyd kjørefelt sperres for bruk av myke trafikanter.

5.3.3 Trafikksituasjon 3: Påhengt gangbane + vogntoglast i tre felt

Denne trafikksituasjonen benyttes for å undersøke om brua har kapasitet til å tåle ordinær kjøring i tre kjørefelt.

Eksisterende rekkverk for å skille kjøre- og gangbane fjernes, og hele brutversnittet belastes i tre kjørefelt. Det antas 3,0 m føringsbredde på den påhengte gangbanen, og 1 kN/m² ganglast.



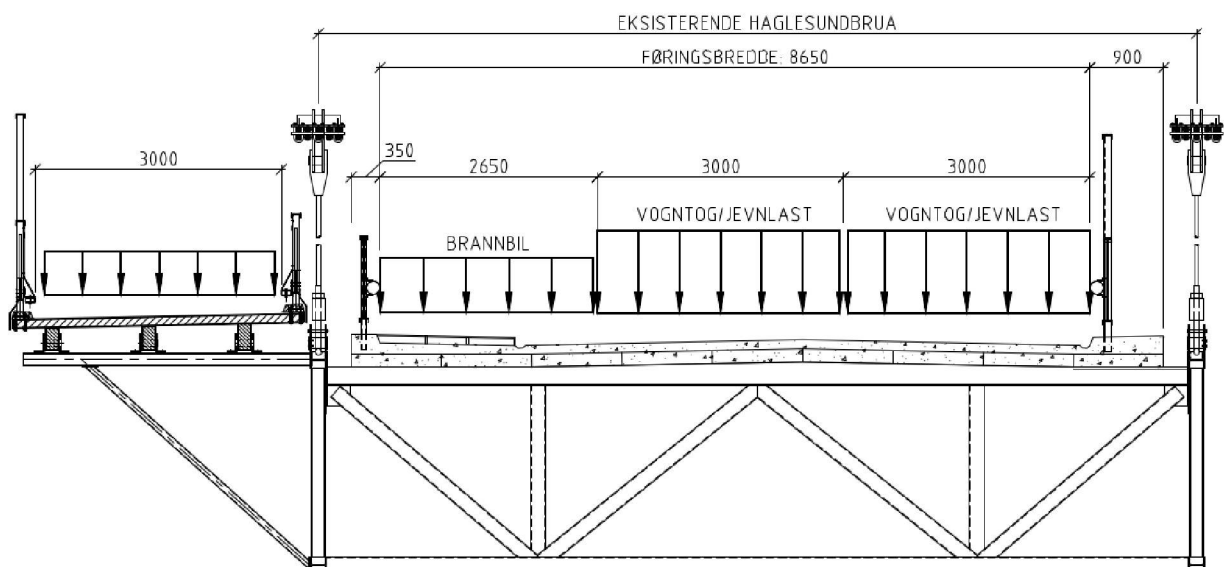
Figur 7: Påhengt gangbane + fri kjøring i tre felt. Ekstrem lastposisjon høyre/venstre er vist på skissen. Påhengt gangbane belastes med 1 kN/m². To felt med vogntog og jevnlast, ett felt med kun jevnlast.

5.3.4 Trafikksituasjon 4: Påhengt gangbane + vogntoglast i to eksist. felt + brannbil

Det planlegges for at normal trafikksituasjon på brua er som nå, med to kjørefelt som plasseres innenfor dagens føringsbredde. Området som benyttes som gangbane idag bygges opp som et fortau med stålrister, slik at det ikke kan benyttes av ordinær trafikk. Som et dimensjonerende lasttilfelle undersøkes konsekvensen av at en tung brannbil passerer et ulykkessted på brua, ved å kjøre over stålristene.

Vekten på brannbilen settes til 250 kN. I henhold til R412 skal beregningsmessig bredde på kjørefelt med tunge kjøretøy (ikke bare jevnlast) være 3,0 m. Det er imidlertid ikke plass til tre felt á 3,0 m på brua. Bredden for feltet med utrykningskjøretøy er derfor satt så stor som mulig, altså 2,65 m. Det antas 3,0 m føringsbredde på den påhengte gangbanen, og 1 kN/m² ganglast.

Sannsynligheten for at denne trafikksituasjonen faktisk oppstår er liten. Ved en nødsituasjon på brua vil trafikken i forkant av ulykken i hver kjøreretning kunne forlate brua før nødkjøretøyene ankommer, slik at reell last i de ordinære kjørefeltene nesten halveres.



Figur 8: Påhengt gangbane + fri kjøring i to felt + brannbil i utrykningsfelt. Tunge kjøretøy krever normalt 3m bredde på lastfelt, men det tilpasses her med noe redusert bredde for feltet med brannbil.

5.3.5 Oppskruingsmoment

Av tegningene fremgår det at avstivningsbæreren er "skrudd opp" ved montering. Dette medfører et tilleggsmoment i bjelken. Nødvendig oppskruing for å nå riktig planumskote ved feltmidt er beregnet basert på følgende informasjon gitt på tegningene:

Planumskote feltmidt:	54.127 m	
Planumskote tårn:	51.000 m	
Koteforskjell:	3.127 m	
Nivå feltmidt ved utlegg i verksted:	1.385 m	(Brubjelken produseres med krumning)
Nødvendig oppskruingsnivå feltmidt:	1.742 m	

Oppskruing gir et konstant moment i avstivningsbæreren. Nødvendig konstant moment som gir ønsket oppskruingsnivå ved feltmidt bestemmes av uttrykket:

$$\Delta M = \frac{8 \cdot u_{max} \cdot E \cdot I}{L^2} = -3.01 \text{ MNm}$$

Hvor:

ΔM	= Oppskruingsmoment	(-3.01 MNm)
u_{max}	= Nødvendig oppskruingsnivå feltmidt	(1.742 m)
I	= Annet arealmoment av avstivningsbæreren	(0.06 m ⁴)
E	= Stålets elastisitetsmodul	(210 GPa)
L	= Spennvidde	(250 m for Haglesundbrua)

Kraften i hver over- og undergurt kan nå beregnes:

$$N = \frac{\Delta M}{2h} = 606 \text{ kN}$$

Hvor

N	= Aksialkraft i gurter (trykk i undergurt)	(606 kN)
h	= Avstand mellom over- og undergurt	(2.55 m)

6 Kapasitetskontroll

I avsnittet vises resulterende utnyttelser for de viktigste elementene i hengebruonstruksjonen.

Tabell 5: Utnyttelse av viktige konstruksjonselementer for ulike lastsituasjoner.

Trafikksituasjon	Trafikk	Kabel	Undergurt	Overgurt	Diagonaler	Tverrfagverk	Betongdekke
1.	Opprinnelig: To felt	0.82	0.89	0.87	0.66	Aksellaster er dimensjonerende*	
2.	Påh. gangbane + to felt	1.00	1.09	0.89	0.78		
3.	Påh. gangbane + tre felt	1.06	1.29	1.22	0.93		
4.	Påh. gangb. + to felt + brannbil	1.00	1.25	1.09	0.82		

* Aksellastene som brua ble dimensjonert for er større enn aksellastene i R412 (Bk10/60), så disse konstruksjonselementene har uten ytterligere beregning kapasitet for Bk10/60.

6.1 Dimensjonering

6.1.1 Kabel

Kabelen har følgende dimensjonerende strekkapasitet (Vedlegg til R412, vedlegg 1, pkt. 4.1 /2/):

$$S_d = 0,667 \frac{S_u}{\gamma_{M1}} = 27792 \text{ kN}$$

Hvor

$$\begin{aligned} S_d &= \text{Dimensjonerende kapasitet kabel} && (27792 \text{ kN}) \\ S_u &= \text{Karakteristisk bruddstyrke kabel (avsn. 4)} && (12 \times 5000 \text{ kN}) \\ \gamma_{M1} &= \text{Materialfaktor kabel} && (1.2) \end{aligned}$$

6.1.2 Undergurt

Undergurten er HEM220, og har følgende kapasitet i strekk:

$$N_{Rd+} = f_{yd} \cdot A_{UG} = 4691 \text{ kN}$$

Knekk lengden settes lik systemlengden, $L_k = 2,043 \text{ m}$. Dimensjonerende knekklast blir (Colbeam):

$$N_{Rd-} = 4062 \text{ kN}$$

Hvor

$$\begin{aligned} A_{UG} &= \text{Areal undergurt} && (14940 \text{ mm}^2) \\ f_{yd} &= \text{Dim. flytespenning undergurt (avsn. 4)} && (314 \text{ MPa}) \end{aligned}$$

Ettersom undergurten kun har en neglisjerbar tverrlast fra egenvekt mellom knutepunktene, tas det i kapasitetskontrollen ikke hensyn til endemomenter som oppstår i analysen pga. knutepunktens rotasjonsstivhet, i henhold til Eurokode (NS-EN 1993-1-8:2005+NA:2009, pkt. 5.1.5 (3) /8/).

6.1.3 Overgurt

I overgurten benyttes HEB200. Ettersom innfestingen mellom betongdekke og overgurt er eksentrisk vil forbindelsen overføre momenter, og det tas hensyn til disse i kapasitetskontrollen.

Opptredende spenning regnes som

$$\sigma_{Ed} = \left| \frac{N_{Ed}}{A_{OG}} \right| + \left| \frac{M_{Ed,y}}{W_{OG,y}} \right| + \left| \frac{M_{Ed,z}}{W_{OG,z}} \right| \leq f_{yd}$$

Hvor

A_{OG}	= Areal overgurt	(7810 mm ²)
$W_{OG,y}$	= Motstandsmoment om sterk akse	(570000 mm ³)
$W_{OG,z}$	= Motstandsmoment om svak akse	(200000 mm ³)
f_{yd}	= Dim. flytespenning undergurt (avsn. 4)	(314 MPa)

$N_{Ed}, M_{Ed,y}$ og $M_{Ed,z}$ er samtidig opptredende aksialkraft/momenter

Det er relativt små aksialkrefter, så det er ikke kontrollert for knekning.

6.1.4 Diagonaler

De langsgående diagonalene har varierende tverrsnitt avhengig av plassering langs brua. Nærmest tårn benyttes et oppsveist tverrsnitt, deretter følger et område med HEB180, mens hoveddelen av spennet har HEA180.

Tverrsnittene har følgende kapasitet i strekk:

$$N_{Rd+} = f_{yd} \cdot A_{Diag} = 2462 \text{ kN} / 2050 \text{ kN} / 1422 \text{ kN}$$

For henholdsvis oppsveist tverrsnitt, HEB180 og HEA180.

Systemlengden for diagonalene er $L = 3,23\text{m}$. For knekning om sterk akse (ut av fagverksplanet) settes knekk lengden konservativt til $L_{k,y} = 0,9L = 2,91\text{m}$. For knekning om svak akse (i fagverksplanet) velges endepunktene for knekk lengden midt i knutepunktene, som gir $L_{k,z} = 0,74L = 2,39\text{m}$. Dimensjonerende knekklast blir (Colbeam):

$$N_{Rd-} = 1986 \text{ kN} / 1556 \text{ kN} / 1073 \text{ kN}$$

Ettersom diagonalene kun har en neglisjerbar tverrlast fra egenvekt mellom knutepunktene, tas det i kapasitetskontrollen ikke hensyn til endemomenter som oppstår i analysen pga knutepunktens rotasjonsstivhet, i henhold til Eurokode (NS-EN 1993-1-8:2005+NA:2009, pkt. 5.1.5 (3) /8/).

6.2 Trafikksituasjon 1

Da Haglesundsbrua i sin tid ble prosjektert hadde brua betongslitelag (ingen asfalt), to kjørefelt og selvsagt ikke påhengt gangbane. For dimensjonering av kabelen ble det i tillegg regnet med ganglast på brua (ikke medtatt i analyse som er gjengitt her). For å gi et bilde av hvor mye senere påført asfalt, påhengt gangbane og økt trafikk påvirker brua, er utnyttelsene for «oppriinnelig» lastsituasjon beregnet og gjengitt. Tabell 5 viser som forventet at alle deler av brua har tilstrekkelig kapasitet for dette lasttilfellet.

6.3 Trafikksituasjon 2

Det er utført analyse av brua med to kjørefelt med tilsvarende eksentrisitet som brua har i dag, samt ganglast på påhengt gangbane. Det konstrueres en føringskant slik at føringsbredden som er på brua i dag opprettholdes, for å sikre at dagens gangfelt ikke kan benyttes av ordinær trafikk. Dette er den forventede normalsituasjonen for trafikk på brua. Kabelutnyttelsen er 100%, som er akseptabelt. Undergurten har en begrenset kapasitetsoverskridelse på 9%. Ved å forsterke ca. 200 m (4 felt á 50 m) med 15x140 mm² flatstål, reduseres maks utnyttelse til 95%. Dette utgjør totalt ca. 3,5 tonn stål.

Overgurt, langsgående diagonaler og resterende deler av konstruksjonen har tilstrekkelig kapasitet.

6.4 Trafikksituasjon 3

Det er utført analyse av brua med tre kjørefelt på brua med ubegrenset trafikk, samt ganglast på påhengt gangbane. Dagens gangfelt frigjøres slik at det kan benyttes av kjøretøy. Kabelutnyttelsen blir 106%, og også undergurten har betydelige kapasitetsoverskridelser i hele bruas lengde. Overgurten har lokale kapasitetsoverskridelser ved opplegg. Ettersom kabelen er et kritisk element som det ikke er mulig å forsterke, fremstår uregulert kjøring i tre felt som lite aktuelt.

6.5 Trafikksituasjon 4

Et viktig formål med å flytte dagens gangfelt ut på en påhengt gangbane, er å bedre fremkommeligheten for utrykningskjøretøy. Ettersom det ikke er aktuelt å tillate uregulert kjøring i tre felt, må dagens gangfelt gis restriksjoner slik at det ikke kan benyttes av ordinær trafikk. En slik begrensning omfattes ikke av standard lastregler i R412/Eurokode. Det er valgt å se nærmere på et lasttilfelle hvor en tung brannbil passerer i utrykningsfeltet, på utsiden av to kjørefelt hvor trafikken står i begge retninger. I forbindelse med en ulykke på brua vil trafikken *foran* ulykken i begge retninger kunne forlate brua. Det betyr at en nødsituasjon med to fulle lastfelt i kritisk posisjon er lite realistisk, og at betraktet trafikksituasjon antagelig er konservativt.

Kabelutnyttelsen er 100%, slik at det ikke er nødvendig med fravikssøknad for et slikt trafikkbilde. Undergurten har overskridelser på opptil 25%, og må forsterkes over ca. 400 m med 30x140 mm² flatstål for å oppnå kapasitet for denne trafikksituasjonen. Dette utgjør totalt ca. 14 tonn stål. For overgurten kreves lokale forsterkningstiltak ved opplegg, mens resterende konstruksjonselementer har tilstrekkelig kapasitet.

7 Usikkerhet

Betraktningens måte for nødtrafikk må bekreftes av Vegdirektoratet.

Det knytter seg noe usikkerhet til nøyaktig vekt av påhengt gangbane, som på det nåværende tidspunkt anslås å være 10-15%. Endelig vekt kan være med på å påvirke om føringsbredden på gangbanen bør settes til 2,5 m eller 3,0 m.

Effekten av vind med økt vindfang fra sikkerhetsrekkverk må undersøkes. Det anses som lite sannsynlig at dette er utslagsgivende.

8 Konklusjon

Analysene som er utført i RM Bridge så langt, viser at brua med rimelig sikkerhet kan forsterkes til å tåle påhengt gangbane på 2,5 m-3,0 m, dagens kjøremønster med to kjørefelt, samt totalt 80 mm asfalt. Rekkverket mellom dagens gang- og kjørebane fjernes, og gangfeltet bygges opp med stålrister slik at kjørebane får en føringskant. Det er mulig å forsterke slik at brua i en nødsituasjon også har kapasitet for at en tung brannbil kjører over stålristerne.

9 Referanser

- /1/ Statens vegvesen – Vegdirektoratet (2014), *Håndbok R412: Bruklassifisering*.
- /2/ Statens vegvesen – Vegdirektoratet (2018), *NA-rundskriv 2017/10: Endringer og tilføyelser til håndbok R412 Bruklassifisering*.
- /3/ Standard Norge (2010), *NS-EN 1991-2 – Eurokode 1: Laster på konstruksjoner – Del 2: Trafikklaster på bruer*.
- /4/ Selberg, A. (1947) *Beregning av små hengebruer*.
- /5/ Selberg, A. (1945) *Design of suspension bridges*. Det kgl. Videnskaber Selskabs skrifter.
- /6/ Aas-Jakobsen (2019) *12-2332_Haglesundbrua_Rapport_Rev-B*
- /7/ Aas-Jakobsen (2019) *Haglesundbrua_alternative_kjøremønstre*
- /8/ Eurokode: *NS-EN 1993-1-8:2005+NA:2009*